



Одиннадцатая глава

## РАСПУСКАЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ

*(Все, что вы хотели знать о конце света,  
но боялись спросить)*

Человек приходит в лабораторию, где его встречают два физика: женщина — старший научный сотрудник и ее ассистент — молодой мужчина, который показывает гостю множество исследовательских приборов, занимающих все помещение: вакуумную камеру из нержавеющей стали, герметичные емкости с хладагентом — азотом или гелием, компьютер, различные измерительные приборы, осциллографы и т. п. Человеку вручают пульт управления и говорят, что в его руках сейчас находится судьба эксперимента, а возможно, и судьба всей Вселенной. Если молодой ученый все сделает правильно, то прибор получит энергию из квантованного вакуума, сделав человечеству необыкновенно щедрый подарок — так называемую «энергию созидания в наших руках». Но если молодой ученый ошибется, предупреждает его умудренный опытом коллега, то прибор может запустить фазовый переход, в результате чего вакуум пустого пространства распадется до более низкого энергетического состояния, высвободив всю энергию сразу. Женщина-физик говорит, что «это будет не только конец Земли, но и конец всей Вселенной». Человек с волнением сжимает пульт управления, его ладони вспотели. Остаются считанные секунды до наступ-

ления момента истины. «Лучше бы тебе решить быстро», — говорят ему.

Хотя это и научная фантастика — отрывок из рассказа «Вакуумные состояния» Джеффри Лэндиса, но возможность распада вакуума не является полной фантазией.<sup>1</sup> Этот вопрос исследовался в течение ряда десятилетий, что видно по публикациям в более серьезных научных журналах, чем *Asimov's Science Fiction*, а именно в *Nature*, *Physical Review Letters*, *Nuclear Physics B* и т. д., таких ученых, как Сидни Коулман, Мартин Рис, Майкл Тёрнер и Фрэнк Вилчек. В настоящее время многие физики, и, вероятно, большинство интересующихся аналогичными вопросами полагают, что вакуумное состояние нашей Вселенной, то есть пустое пространство, лишённое всякого вещества, за исключением частиц, хаотически движущихся в результате квантовых флуктуаций, является скорее *метастабильным*, нежели стабильным. Если эти теоретики правы, то вакуум, в конечном счете, распадется, что будет иметь для мира самые разрушительные последствия (по крайней мере с нашей точки зрения), хотя эти неприятности могут и не наблюдаться до тех пор, пока не исчезнет Солнце, не испарятся черные дыры, не распадутся протоны.

Хотя никто не знает, что случится в долгосрочной перспективе, но похоже, с одним многие согласны, по крайней мере в некоторых научных кругах: текущее устройство мира не является неизменным, и в конце концов произойдет распад вакуума. Опровержения обычно звучат следующим образом: хотя многие исследователи считают, что полностью стабильное вакуумное энергетическое состояние или космологическая постоянная не согласуются с теорией струн, не следует забывать, что сама теория струн, в отличие от описывающих ее математических утверждений, пока не доказана. Более того, я должен напомнить читателям, что я математик, а не физик, а мы затронули области, которые выходят за пределы моей компетенции. Вопрос о том, что может произойти в конце концов с шестью компактными измерениями из теории струн должны ставить физики, а не математики. Поскольку гибель этих шести измерений может быть связана с гибелью части нашей Вселенной, исследования такого рода обязательно включают неопределенный, даже недостоверный эксперимент, так как, к счастью, мы еще не провели решающий эксперимент, касающийся конца нашей Вселенной. И у нас нет возможностей, кроме богатого воображения, как у Лэндиса, чтобы поставить его.

Помня об этом, по возможности отнеситесь к этой дискуссии со здоровым скепсисом, используя выбранный мною подход, — как к фантастическим скачкам в стране вероятности. Появится шанс выяснить, что физики думают о том, что может произойти с шестью скрытыми измерениями, о которых ведется так много споров. У нас пока нет никаких доказательств, и мы даже не знаем, как это можно проверить, но я предоставляю вам возможность увидеть, как далеко может завестись фантазия и компетентные спекуляции.

Представьте, что ученый в рассказе Лэндиса нажал на кнопку пульта управления, внезапно инициировав цепь событий, которые привели бы к распаду вакуума. Что бы произошло тогда? А вот этого никто не знает. Но независимо от результата — придется ли нам пройти через огонь или через лед (почти по Роберту Фросту, который писал: «Одни твердят, что сгинет мир в огне, другие — что во льду...») — наш мир, безусловно, должен измениться до неузнаваемости. Как написал Эндрю Фрей (университет Макджилла) с коллегами в одном из номеров «*Physical Review D*» в 2003 году: «один из видов распада [вакуума], рассмотренный в этой статье, в полном смысле будет означать конец Вселенной для любого, кто будет иметь несчастье стать свидетелем этого»<sup>2</sup>. В этом плане существуют два сценария. Оба связаны с радикальными изменениями статус-кво, хотя первый сценарий более суровый, поскольку влечет за собой конец пространства-времени в том виде, в котором оно нам известно.

Давайте вспомним рисунок из десятой главы, где изображен небольшой мяч, катящийся по слегка искривленной поверхности, на которой высота каждой точки соответствует различным уровням энергии вакуума. В данный момент наш шар находится в полустабильном состоянии, которое называется *потенциальной ямой* — по аналогии с небольшим углублением или ямой на каком-нибудь холмистом ландшафте. Предположим, что дно этой ямы находится выше уровня моря, или, другими словами, — значение энергии вакуума остается положительным. Если этот ландшафт является классическим, то шар будет находиться в этой яме бесконечно. Другими словами, его «место отдыха» станет его «местом последнего успокоения». Но ландшафт не является классическим. Это ландшафт квантовой механики, а в этом случае могут происходить интересные вещи: если мяч чрезвычайно мал и поэтому подчиняется законам квантовой механики, то он может в буквальном смысле пробуравить стенку ямы, чтобы достичь внешнего мира, — что является

результатом совершенно реального явления, известного как *квантовое туннелирование*. Оно возможно благодаря *фундаментальной неопределенности*, одному из понятий квантовой механики. Согласно принципу неопределенности, сформулированному Вернером Гейзенбергом, местоположение вопреки мантре риелторов — это не только вещь, и это даже не абсолютная вещь. И если существует наибольшая вероятность обнаружить частицу в одном каком-то месте, то существует также и вероятность найти ее в других местах. А если такая вероятность существует, утверждает теория, то, в конце концов, это событие произойдет при условии достаточно длительного ожидания. Этот принцип верен для мячей любых размеров, хотя для большого мяча вероятность обнаружить его в другом месте значительно меньше, чем для маленького.

Как ни странно, эффекты квантового туннелирования можно наблюдать в реальном мире. Это хорошо исследованное явление лежит в основе работы сканирующих туннельных микроскопов, когда электроны проходят через, казалось бы, непроходимые барьеры. По аналогичной причине производители чипов не могут сделать их слишком тонкими, иначе работе чипов будет мешать утечка электронов в результате туннельных эффектов.

Идея о частицах, например электроне, метафорически или реально туннелирующем через стену, — это одно, а как насчет пространства-времени в целом? Понятие туннелирования вакуума при переходе из одного энергетического состояния в другое является, по общему признанию, сложным для понимания, хотя эта теория была хорошо разработана еще Коулманом с коллегами в 1970-е годы.<sup>3</sup> В этом случае барьером является не стена, а некий вид энергетического поля, который не дает вакууму перейти к состоянию с меньшей энергией, более стабильному, а следовательно, более предпочтительному. Изменение в этом случае происходит за счет фазового перехода аналогично тому, как жидкая вода превращается в лед или пар, но при этом изменяется большая часть Вселенной, возможно, даже та ее часть, где обитаем мы.

Это подводит нас к кульминационному моменту первого сценария, при котором нынешнее состояние вакуума туннелирует из состояния с небольшой положительной энергией (фактически то, что сегодня называется темной энергией или космологической константой) в состояние с отрицательной энергией. В результате энергия, которая в настоящее время заставляет нашу Вселенную ускоренно расширяться,

сожмет ее в точку, что приведет к катастрофическому событию, известному под названием Большое сжатие. При такой космической сингулярности как плотность энергии, так и кривизна Вселенной станут бесконечными, что равносильно тому, как если бы мы неожиданно попали в центр черной дыры или если бы Вселенная вернулась к состоянию Большого взрыва.

События, которые могут последовать за Большим сжатием, можно описать двумя словами: «ставки сделаны!» «Мы не знаем, что случится с пространством-временем, не говоря уже о том, что случится с дополнительными измерениями», — отмечает физик Стив Гиддингс из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре<sup>4</sup>. Это лежит за пределами нашего опыта и понимания почти во всех отношениях.

Квантовое туннелирование является не единственным способом инициировать изменение состояния вакуума: это можно сделать с помощью так называемых тепловых флуктуаций. Давайте вернемся снова к нашему крошечному мячу на дне потенциальной ямы. Чем выше температура, тем быстрее движутся атомы, молекулы и другие элементарные частицы. А если частицы движутся, некоторые из них случайно могут врезаться в мяч, толкая его в ту или иную сторону. В среднем эти столкновения уравниваются, и мяч остается в относительно стабильном положении. Но предположим, что при статистически благоприятной ситуации несколько атомов врезаются в мяч последовательно, причем в одном и том же направлении. В результате одновременного действия нескольких таких столкновений мяч может быть вытолкнут из ямы. Он покатится по наклонной поверхности и, возможно, будет катиться до тех пор, пока его энергия не станет равной нулю, если, конечно, при движении он не окажется в другой яме или углублении.

В качестве более удачной аналогии можно привести испарение, считает физик Мэтью Клебан из Нью-Йоркского университета: «Невооруженным глазом невозможно увидеть, как вода испаряется из чашки, — объясняет он. — Но молекулы воды постоянно сталкиваются, особенно если вода нагревается, а иногда они сталкиваются с такой силой, что выплескиваются из чашки. Это похоже на то, что происходит в тепловом процессе»<sup>5</sup>.

Однако существуют два важных различия. Одно из них заключается в том, что обсуждаемые здесь процессы происходят в вакууме, а это традиционно означает отсутствие материи, а следовательно, и частиц. Что же тогда сталкивается? Во-первых, температура никогда не до-

стигает нуля (фактически, это оказалось одним из свойств расширяющейся Вселенной), а во-вторых, пространство никогда не бывает полностью пустым, поскольку пары виртуальных частиц — частица и античастица — непрерывно возникают и исчезают в результате аннигиляции в такой короткий промежуток времени, что мы никак не можем поймать их с полочным. Другое отличие заключается в том, что этот процесс виртуального рождения и уничтожения является квантовым, поэтому, говоря о тепловых флуктуациях, необходимо не забывать о квантовом вкладе.

Теперь мы готовы обсудить второй сценарий, который, возможно, мягче, чем первый, но не намного. С помощью квантового туннелирования или, возможно, тепловой или квантовой флуктуации наша Вселенная может перейти в другое метастабильное состояние (вероятнее всего, с более низким уровнем энергии вакуума) на ландшафте теории струн. Но это, как и в случае нашей текущей ситуации, будет только временным состоянием («небольшой промежуточной станцией»), или метастабильной остановкой-отдыхом на пути к конечному пункту назначения. Этот вопрос связан с тем, как Шамит Качру, Рената Каллош, Андрей Линде и Сандип Триведи (авторы статьи KKLТ) описали акт великого исчезновения в теории струн, дающей нам представление о Вселенной с четырьмя большими измерениями, а не десятью, одновременно включив гипотезу инфляции в струнную космологию. И хотя в настоящее время мы видим только четыре измерения, «в далеком будущем Вселенная “не захочет” быть четырехмерной, — считает Андрей Линде, специалист по космологии из Стэнфорда. — Она “хочет” быть десятимерной»<sup>6</sup>. И если запастись терпением, то можно этого дождаться.

Согласно Линде, компактифицированные измерения хороши в краткосрочном плане, но они не идеальны для Вселенной в долгосрочной перспективе. «Сейчас мы как будто стоим на вершине здания, но еще не спрыгнули с него. Если мы не сделаем это по доброй воле, то квантовая механика сделает это за нас, “сбросив” на самый низкий уровень энергетического состояния».<sup>7</sup>

Причина, по которой Вселенная с десятью некомпактифицированными измерениями является эргономически предпочтительной, заключается в том, что в самых современных моделях, известных сегодня, энергия вакуума является следствием компактификации дополнительных измерений. Иначе говоря, темная энергия, о которой так много говорят,

не просто управляет ускоряющимся расширением Вселенной, но часть (если не вся) этой энергии идет на удержание дополнительных измерений в компактифицированном состоянии, сжатых туже, чем пружины швейцарских часов. Только в нашей Вселенной, в отличие от часов «Rolex», это делают потоки и браны.

Другими словами, рассматриваемая система обладает положительной потенциальной энергией. Чем меньше радиус дополнительных измерений, тем туже закручена пружина и тем больше запасенная энергия. И наоборот, с увеличением радиуса этих измерений потенциальная энергия снижается, достигая нулевого значения, когда радиус становится бесконечным. Это самый низкий уровень энергетического состояния и, следовательно, действительно устойчивый вакуум — точка, в которой плотность темной энергии достигает нулевого значения, а радиусы всех десяти измерений становятся бесконечно большими. Другими словами, когда-то небольшие внутренние измерения становятся декомпактифицированными.

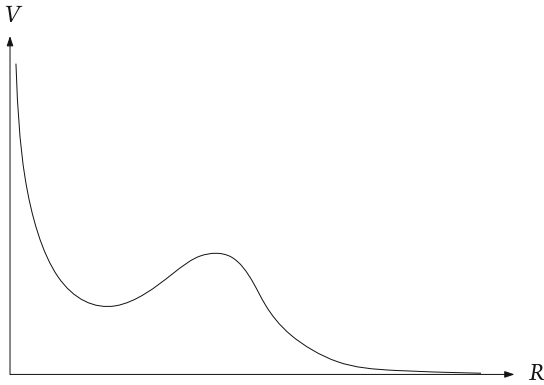
Декомпактификация представляет собой явление, обратное компактификации, которая, как мы говорили, составляет одну из самых больших проблем в теории струн: если эта теория описывает Вселенную десятимерной, то почему мы видим только четыре измерения? Струнные теоретики затрудняются дать ответ на вопрос, каким образом дополнительные размерности теории так тщательно спрятаны, поскольку, по мнению Линде, при прочих равных условиях измерения должны быть довольно крупными. Это похоже на попытку увеличить объем воды в заполненном резервуаре с жесткими стенками. В каждом направлении, в любом уголке такой структуры вода будет стремиться наружу. И она не прекратит своих попыток, пока не реализует их. Когда это произойдет и стенки резервуара вдруг поддадутся, вода, ограниченная компактной областью (объемом резервуара), выльется и растечется по обширной поверхности. Исходя из современного представления о теории струн, то же самое произойдет с компактными измерениями — свернутыми в пространства Калаби–Яу или в другие сложные конфигурации. Независимо от того, какая конфигурация выбрана для внутренних измерений, они в конце концов развернутся и раскроются.

Конечно, может возникнуть вопрос: если декомпактификация измерений выгодна с энергетической точки зрения, то почему этого до сих пор не произошло? Одно из решений, предлагаемых физиками (см. десятую главу), привлекает браны и потоки. Предположим, что

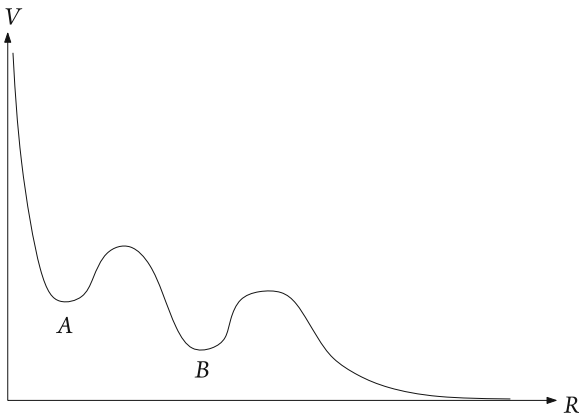
у нас есть перекачанная велосипедная камера, из-за чего в каком-нибудь наиболее тонком месте велосипедной покрышки может образоваться вздутие — пузырь, который в конце концов лопнет. Можно укрепить слабое место шины, наложив заплату, которая чем-то напоминает брану, или перемотать всю покрышку резиновой лентой, чтобы сохранить ее форму, что делают потоки с пространствами Калаби–Яу. То есть суть идеи в том, что мы имеем две противоположные силы — естественное стремление к расширению (к перекачанной камере) и сдерживающие это расширение браны, потоки и другие структуры, наматывающиеся вокруг объекта и, таким образом, удерживающие его. В настоящее время эти противодействующие силы превосходно сбалансированы и находятся в равновесии.

Однако этот мир неустойчив. Если радиус дополнительного измерения увеличивается за счет небольших квантовых флуктуаций, то браны и потоки обеспечивают возвращающую силу, которая быстро приводит радиусы измерений к исходному состоянию. Но если чрезмерно растянуть измерение, то браны или потоки могут разорваться. Гиддингс объясняет это следующим образом: «в конце концов особо сильная флуктуация увеличит радиус до порогового значения декомпактификации<sup>8</sup>» и, оказавшись на правом склоне графика (рис. 11.1), мы покатаемся вниз до бесконечности.

На рис. 11.2 показана похожая ситуация, но с одним нюансом. Вместо прямого туннелирования во Вселенную с десятью декомпактифицированными измерениями мы сделаем по пути одну или несколько остановок. Но в любом случае, будете ли вы лететь без промежуточной посадки или сделаете пересадку в Далласе или Чикаго, конечный пункт один и тот же. Причем неотвратно. И похоже, что посадка будет очень мягкой. Стоит помнить, что изменение, когда оно произойдет, будет фазовым переходом вакуума, а не мячом, выкатывающимся из ямы или пробивающим стену. Изменение начинается с возникновения крошечного пузыря, но этот пузырь будет расти экспоненциально. Внутри пузыря компактификация шести измерений почти планковских размеров начнет сама себя раскручивать. По мере роста пузыря пространство-время четырех больших измерений и шести свернутых измерений начнут объединение. Там, где размерности были разделены на компактифицированные и расширенные, окажется десять декомпактифицированных, объединенных вместе, размерностей без разделяющих их барьеров.



**Рис. 11.1.** Одна теория утверждает, что наша Вселенная находится в небольшой яме в левой части графика, что удерживает потенциальную энергию вакуума ( $V$ ) на определенном уровне, а также фиксирует радиус ( $R$ ) дополнительных компактифицированных измерений. Однако такое состояние не может быть вечным. Небольшое возмущение может вытолкнуть нас на правую вершину, или мы можем пройти через барьер за счет квантового туннелирования и покатиться вниз по правой части графика к бесконечно большому дополнительному измерению. Этот процесс, за счет которого ранее крошечные размерности разворачиваются, чтобы превратиться в огромные, называют декомпактификацией (адаптировано, с разрешения, с рисунка Стива Гиддинга)



**Рис. 11.2.** Здесь ситуация намного интереснее, чем на рис. 11.1. Наша Вселенная все еще направляется к декомпактификации и области бесконечно больших дополнительных измерений, только на этот раз мы собираемся сделать промежуточную остановку на ландшафте вдоль этого маршрута. По этому сценарию нашу Вселенную можно рассматривать как небольшой мячик, который при скатывании вниз с холма временно задержался во впадине (A). В принципе, мячик мог бы сделать множество временных остановок при спуске, хотя на этом графике показана только одна дополнительная впадина (B) (адаптировано, с разрешения, с рисунка Стива Гиддинга)

«Мы говорим о пузыре, который расширяется со скоростью света, — говорит Шамит Качру. — Он возникает в определенном месте пространства-времени, аналогично зарождению пузырьков в воде. Отличие состоит в том, что такой пузырь не поднимается сразу вверх и не лопается. Наоборот, он расширяется и вытесняет всю воду»<sup>9</sup>.

Но как может пузырь двигаться столь быстро? Причина состоит в том, что декомпактификационное состояние внутри пузыря находится на более низком энергетическом уровне, чем мир за его пределами. Поскольку системы естественным образом эволюционируют в состояния с более низкой энергией, в нашем случае — в направлении увеличения радиуса компактифицированных измерений, градиент потенциальной энергии создает силу на краю пузыря, вызывающую ускорение, направленное наружу.

Это ускорение разгоняет пузырь до скорости света за какие-то доли секунды.

Линде описывает это явление более красочно: «Пузырь стремится двигаться как можно быстрее, а если у вас есть возможность прекрасно существовать на более низком энергетическом уровне, то зачем ждать? — спрашивает он. — Поэтому пузырь движется все быстрее и быстрее, но он не может двигаться быстрее света»<sup>10</sup>. Хотя, если бы он знал, какая награда его ждет, то постарался бы обогнать свет, если бы мог.

В связи с тем, что пузырь растет со скоростью света, мы никогда не узнаем, что нас постигнет. Единственным предварительным предупреждением, которое мы получим, будет ударная волна, которая придет раньше на долю секунды. Пузырь с огромной кинетической энергией обрушится на нас фронтом этой ударной волны. Но это только первый раунд конца света. Поскольку стенка пузыря обладает малой толщиной, то понадобятся какие-то доли секунды, чтобы произошло самое худшее. В месте, которое мы называем своим домом, действуют четырехмерные законы физики, тогда как внутренняя часть пузыря подчиняется законам десятимерного пространства. И эти законы вступят в действие, как только внутренняя часть пузыря проникнет в наш мир. Как однажды заметил драматург Дэвид Мамет: «Все меняется».

Фактически, все, что вы можете представить себе: от самой крошечной частички до таких замысловатых структур, как галактические сверхскопления, внезапно разорвется на шесть расширяющихся измерений. Планеты и люди превратятся в составляющие их компоненты, а эти компоненты также прекратят свое существование. Таких отдельных ча-

стиц, как кварки, электроны и фотоны, уже не будет — они или соединятся, чтобы продолжить свое существование вместе, или возродятся снова, но суже новыми массами и новыми свойствами. Хотя пространство-время все еще будет существовать, пусть и в измененном состоянии, законы физики изменятся радикально.

Сколько нам осталось до такого «взрыва» измерений? Мы очень надеемся, что вакуум нашей сегодняшней Вселенной является устойчивым с тех пор, как примерно 13,7 миллиарда лет назад закончилась инфляционная фаза, отмечает Генри Тай (Henry Tye) из Корнеллского университета. «Но если ожидаемый срок жизни Вселенной составляет пятнадцать миллиардов лет, то нам осталось примерно миллиард лет или около того».<sup>11</sup> У нас еще достаточно времени, до того как настанет момент «паковать чемоданы».

Но по всем признакам нажимать тревожную кнопку еще рано. Может пройти чрезвычайно много времени (приблизительно  $e^{(10^{120})}$  лет до распада нашего пространства-времени. Это число настолько большое, что его сложно представить даже математикам. Мы говорим о  $e$  — одной из фундаментальных констант природы, числе, которое равно примерно 2,718, умноженном само на себя  $10^{120}$  (единица со ста двадцатью нулями) раз. Если это грубое предположение верно, то наш период ожидания будет практически бесконечно долгим.

Откуда же взялось в нашей оценке число  $e^{(10^{120})}$ ? Исходной посылкой является предположение, что наша Вселенная эволюционирует в нечто, называемое пространством де Ситтера, — пространство с преимущественно положительной космологической константой, в котором все вещество и излучение становятся в конце концов настолько разреженными, что практически исчезают. Впервые такое пространство было описано в 1917 году датским астрофизиком Виллемом де Ситтером как решение уравнений Эйнштейна для пустого пространства. Если наша Вселенная со своей малой космологической константой является «де Ситтеровой», то энтропия такого пространства будет очень большой, порядка  $10^{120}$  (откуда взялась эта оценка — чуть позже). Энтропия так велика, поскольку велик объем де ситтеровской Вселенной. Подобно тому как в большом ящике больше разных мест, в которые можно поместить электрон, чем в маленьком, так у большой Вселенной больше возможных состояний (а следовательно, и более высокая энтропия), чем у небольшой.

Пространство де Ситтера обладает горизонтом событий, так же как и черная дыра. Если вы приблизитесь к черной дыре и перейдете роковую

черту, она втянет вас внутрь, и вы уже не вернетесь домой к ужину. То же верно и в отношении света, который не сможет покинуть дыру. Это также верно и в случае горизонта де Ситтера. Если зайти слишком далеко в пространство, которое расширяется с ускорением, то вы никогда не сможете вернуться в точку, откуда стартовали. Свет, как и в случае черной дыры, тоже не сможет вернуться назад.

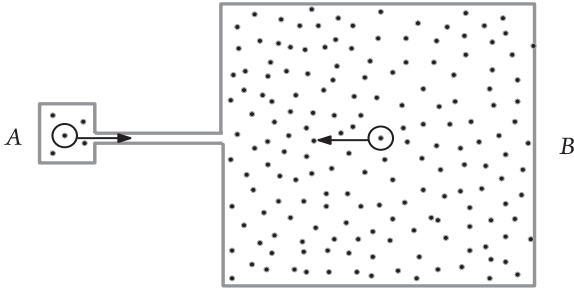
Когда космологическая постоянная мала, а ускоренное расширение происходит относительно медленно, что имеет место в современном мире, горизонт находится очень далеко. Вот почему объем этого пространства такой большой. И наоборот, если космологическая постоянная велика, а Вселенная расширяется с огромной скоростью, то горизонт (или критическая точка) может находиться очень близко — чуть ли не под рукой (в буквальном смысле), и объем соответственно будет мал. «Если вы засунете вашу руку слишком далеко в такое пространство, — объясняет Линде, — то быстрое расширение может оторвать вам ее».<sup>12</sup>

Хотя энтропия пространства де Ситтера коррелирует с объемом, правильнее будет сказать, что она коррелирует с площадью поверхности горизонта событий, которая определяется расстоянием (точнее, квадратом расстояния) до горизонта. Фактически, можно использовать то же обоснование и формулу Бекенштайна–Хокинга, что мы применяли к черным дырам в восьмой главе, то есть энтропия де Ситтера пропорциональна площади горизонта, деленной на четыре ньютоновские гравитационные постоянные  $G$ . Расстояние до горизонта, или, формально, — квадрат расстояния, в свою очередь зависит от космологической постоянной: чем больше значение космологической постоянной, тем меньше расстояние. Поскольку энтропия соизмерима с квадратом расстояния, а квадрат расстояния обратно пропорционален космологической постоянной, то энтропия также будет обратно пропорциональна космологической постоянной. По Хокингу, верхний предел для космологической постоянной в нашей Вселенной составляет  $10^{-120}$  в «безразмерных единицах», которые используют физики.<sup>13</sup> Число  $10^{-120}$  является грубым приближением, его не следует воспринимать как точную цифру. Энтропия, будучи обратно пропорциональной космологической постоянной, получается чрезвычайно большой — примерно  $10^{120}$ , как упоминалось выше. Энтропия по определению равна не числу состояний, а натуральному логарифму числа состояний. Поэтому количество состояний фактически равно  $e^{\text{энтропия}}$ . Вернемся к графику на рис. 11.1, где

число возможных состояний в нашей Вселенной с небольшой космологической постоянной, которая (Вселенная) представлена локальным минимумом на кривой, составляет  $e^{(10^{120})}$ .

Предположим, что поверхность горной вершины, с которой объект скатывается вниз к измерениям бесконечного радиуса, является таким исключительным местом, где существует только одно состояние, которое доставит вас точно на вершину. Поэтому вероятность посадки в этом конкретном месте среди всех других вероятностей исчезающе мала — порядка  $1/e^{(10^{120})}$ . Вот почему время туннелирования через барьер является настолько большим, что мы даже не можем назвать его астрономическим.

Еще одно замечание: на рис. 11.2 мы представили сценарий декомпактификации, при котором наша Вселенная туннелирует до состояния с более низким значением энергии вакуума (или меньшей космологической постоянной), делая промежуточную остановку на ландшафте во время своего путешествия к конечной перестройке — бесконечным радиусам измерений. Но можем ли мы, туннелируя, отправиться обратно, к месту с более высокой энергией вакуума? Безусловно, катиться под гору намного проще. Можно показать это следующим рассуждением. Предположим, что имеется потенциальный минимум в точке  $A$  и отдельный минимум в точке  $B$ , причем точка  $A$  расположена выше, чем  $B$ , а следовательно, имеет большую энергию вакуума. Поскольку в точке  $A$  более высокая энергия, то сильнее и гравитация, и пространство в ней будет иметь более высокую кривизну. А если мы будем рассматривать это пространство как сферу, ее радиус будет меньше, поскольку сферы меньших размеров имеют большую кривизну, чем сферы больших размеров. Поскольку в точке  $B$  более низкая энергия, то гравитация будет слабее. Следовательно, пространство вокруг нее будет иметь меньшую кривизну. А если мы будем рассматривать это пространство как сферу, ее радиус будет больше, и поэтому она будет обладать меньшей кривизной. Мы проиллюстрировали некоторые аспекты этой идеи на рис. 11.3 (используя для  $A$  и  $B$  ящики, а не сферы), чтобы показать, что объект, вероятнее всего, путешествует вниз к ландшафту с более низкой энергией — от  $A$  к  $B$ , чем вверх. Для большей наглядности можно соединить два ящика тонкой трубкой. Эти два ящика со временем придут в равновесие и будут иметь одинаковую концентрацию, или плотность, газов, а количество молекул, переходящих из  $A$  в  $B$ , будет равно количеству молекул, переходящих из  $B$  в  $A$ .



**Рис. 11.3.** На этом рисунке сделана попытка показать, почему легче «туннелировать вниз» от  $A$  к  $B$  (см. рис. 11.2), а не «туннелировать вверх» от  $B$  к  $A$ . Аналогия, представленная здесь, показывает, что обнаружить молекулу в  $B$  более вероятно, чем в  $A$ , просто потому, что количество молекул в  $B$  гораздо больше, чем в  $A$

Однако поскольку  $B$  намного больше, чем  $A$ , в нем намного больше молекул. Поэтому вероятность перехода любой отдельной молекулы из  $A$  в  $B$  намного больше, чем вероятность перехода отдельной молекулы из  $B$  в  $A$ . Аналогично, вероятность появления пузыря, который перенесет вас в место с низкой энергией на ландшафте, существенно выше, чем вероятность возникновения пузыря, который перенесет вас в обратном направлении (в гору), как и любая молекула с большей вероятностью совершит переход из ящика  $A$  в  $B$ .

В 1890 году Анри Пуанкаре опубликовал свою так называемую теорему о возвращении, которая утверждает, что любая система с фиксированным объемом и энергией, которую можно описать с помощью статистической механики, обладает характеристическим временем возвращения в исходное состояние, равным  $e^{\text{энтропия системы}}$ . Идея состоит в том, что такая система обладает конечным числом состояний — конечным количеством положений частиц и скоростей. Если вы будете стартовать с определенного состояния и ждать достаточно долго, то, в конце концов, достигнете всех состояний, подобно тому как частица или молекула в нашем ящике будет «брести, не разбирая дороги», отскакивая от стенок и двигаясь хаотически, со временем побывает в каждом из всех возможных мест ящика. Выражаясь научным языком, мы будем говорить не о возможных местах ящика, а о возможных состояниях в «фазовом пространстве». Тогда время, необходимое пространству-времени для декомпактификации, равно времени возвращения Пуанкаре — то есть  $e^{\text{энтропия}}$ , или  $e^{(10^{120})}$  лет. Но, по мнению Клебана, в этом доказательстве существует одно слабое звено. «Мы еще не имеем статистическо-меха-

нического описания пространства де Ситтера». При этом мы априори предполагаем (что может оказаться правдой, а может, и нет), что такое описание возможно.<sup>14</sup>

В настоящее время нам нечего добавить по этому вопросу, да и немного сделано в этом направлении, за исключением, возможно, уточнения вычислений, оценок и повторной проверки нашей логики. Неудивительно, что немногие исследователи склонны работать в этом направлении и дальше, поскольку мы говорим о чрезвычайно теоретических событиях в сценариях, зависящих от модели, которые еще нельзя проверить, и сама возможность проверки появится не скоро. Работа в этом направлении вряд ли гарантирует предоставление грантов или получение молодыми исследователями признания у своих старших коллег и, что важнее, не гарантирует карьерного роста.

Гиддингс, уделявший этому предмету больше внимания, чем другие ученые, не впадает в отчаяние от явных признаков картины Судного дня. «Если брать положительную сторону, — пишет он в своей статье “The Fate of Four Dimensions” (“Судьба четырех измерений”), — то распад может привести к состоянию, которое не разделяет конечную судьбу бесконечного разрежения», как это происходило бы в постоянно расширяющейся Вселенной, наделенной положительной космологической постоянной, которая действительно постоянна. «Можно искать утешение как в относительно долгой жизни нашей сегодняшней четырехмерной Вселенной, так и в том, что в перспективе ее распад приведет к состоянию, способному поддерживать интересные структуры, возможно, даже жизнь, хотя и сильно отличающуюся от нашей сегодняшней жизни»<sup>15</sup>.

Как и Гиддингса, меня особо не беспокоит судьба наших четырех, шести или даже десяти измерений. Как я уже упоминал ранее, исследования в этой области вызывают интерес и наводят на размышления, но они все же сильно гипотетические. Пока мы не получим данные астрономических наблюдений, которые подтвердят теорию, или, по крайней мере, не получим практических стратегий для проверки этих сценариев, я буду считать их больше научной фантастикой, чем наукой. Поэтому лучше не тратить время, беспокоясь о декомпактификации, а подумать о способах подтверждения существования дополнительных размерностей. Успех в этой области, на мой взгляд, будет более чем достаточен, чтобы перевесить потенциальный недостаток различных сценариев распада, которые могут, в конце концов, привести нашу Вселенную к пла-

чевному концу — ни один из других финалов, если правильно подойти к ним, не станет выглядеть лучше.

На мой взгляд, развертывание скрытых измерений может стать самым впечатляющим зрелищем из всех когда-либо наблюдаемых, если его, конечно, можно будет наблюдать, хотя это выглядит чрезвычайно проблематично. Позвольте мне еще немного пофантазировать и предположить, что такой сценарий, в конце концов, будет реализован и что великий распад пространства-времени произойдет в некоторой точке в далеком будущем. В таком случае это будет прекрасным подтверждением (хотя и запоздалым) идеи, которой я посвятил лучшую часть своей карьеры. Жаль, что, когда наиболее потаенные места Вселенной, наконец, будут открыты, а космос полностью раскроет свое многомерное великолепие, рядом не будет никого, кто смог бы это оценить. А если кто-то и переживет великую трансформацию, то не будет фотонов, которые позволили бы это наблюдать. Не останется никого, кто мог бы отпраздновать успех этой теории, придуманной созданиями, называвшими себя людьми, в эпоху, известную как XX столетие, хотя правильнее относить ее к 137 000 000 столетию с момента Большого взрыва.

Такая перспектива особенно устрашает таких, как я, потративших десятилетия на решение проблемы геометрии шести внутренних измерений и объяснения ее людям (что еще труднее), которые находят все эти понятия заумными, если не абсурдными. Поскольку в тот момент истории Вселенной — момент великого космического «разматывания», глубоко скрытые сейчас дополнительные измерения больше не будут математической абстракцией, они перестанут быть дополнительными. Наоборот, они будут законной частью нового порядка, в котором все десять измерений будут существовать на равных, но вы никогда не узнаете, какое из них было когда-то свернутым, а какое — развернутым. Вас это не будет волновать. С десятью размерностями пространства-времени и шестью новыми направлениями жизнь получит столько возможностей, что мы не можем себе их даже представить.